第 37 卷第 6 期 生 态 学 报 Vol.37,No.6
2017 年 3 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Mar.,2017

DOI: 10.5846/stxb201511102273
索立柱,黄明斌, 段良霞,张永坤.黄土高原不同土地利用类型土壤含水量的地带性与影响因素.生态学报,2017,37(6):2045-2053.
Suo L Z, Huang M B, Duan L X, Zhang Y K.Zonal pattern of soil moisture and its influencing factors under different land use types on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica,2017,37(6):2045-2053.

黄土高原不同土地利用类型土壤含水量的地带性与影响因素

索立柱[1],黄明斌[1,*], 段良霞[1,2],张永坤[1,3]

1 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100
2 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100
3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:通过对黄土高原南北样带大面积(北纬 34°05′—40°75′、东经 107°14′—111°09′)土壤含水量(0—500 cm 剖面)测定和相应植被类型调查,研究了黄土高原农田、草地、灌木林地和乔木林地 4 种土地利用类型土壤含水量的空间变化及它们之间的差异性。结果表明:黄土高原 4 种土地利用类型的土壤含水量皆呈现南北向地带性变化,自南向北土壤含水量有明显递减趋势,与多年平均降雨量、潜在蒸散量、土壤质地等的分布具有一致性;同一地点不同土地利用类型下土壤水分含量具有显著差异(农地>草地>灌木和乔木林地),不同植被类型根系分布、蒸散耗水量的不同是造成含水量差异性的原因。植被建设应遵循土壤水分分布规律,研究结果对黄土高原植被恢复建设具有一定参考价值。

关键词:黄土高原;土壤水分;植被类型;空间变化

Zonal pattern of soil moisture and its influencing factors under different land use types on the Loess Plateau

SUO Lizhu[1], HUANG Mingbin[1,*], DUAN Liangxia[1,2], ZHANG Yongkun[1,3]

1 *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau*, *Institute of Soil and Water Conservation*, *Northwest Agriculture and Forestry University*, *Yangling* 712100, *China*
2 *College of Resources and Environment*, *Northwest Agriculture and Forestry University*, *Yangling* 712100, *China*
3 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*

Abstract: Soil moisture is a key factor for plant growth and eco-environment restoration on the Loess Plateau, China. The Loess Plateau is has an arid and semi-arid climate, complicated landforms, and a unique loess-deposition soil environment. The understanding of zonal pattern in soil moisture under different land use types is fundamental for environmental mnagement for the selection and plantation of non-native vegetation types. In the present study, a transect with an area of 194000 km^2 was selected at the center of the Loess Plateau with a north-south direction to investigate the effects of the changes in rainfall, potential evaporation, soil texture, and vegetation types on soil moisture. This transect included all vegetation, soil, and climatic types of the Loess Plateau. Soil moisture profiles of 0—500 cm under farmland, grassland, shrub land and woodland were measured using the sampling method in 29 counties from the southern to northern Loess Plateau from July to August 2014. Soil texture, vegetation, slope, slope direction, elevation, latitudes, and longitudes were also measured. The results showed that: 1) soil moisture under four land use types decreased gradually from the southern to

基金项目:国家自然科学基金重大项目(41390463)
收稿日期:2015-11-10; **网络出版日期**:2016-08-02
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hmbd@ nwsuaf.edu.cn

the northern Loess Plateau with increasing latitude. This corresponded to the distribution of the mean annual precipitation, potential evapotranspiration, and soil clay texture across the Loess Plateau; 2) soil moisture was significantly different under different land use types through the comparison of soil moisture in horizontal and vertical directions. The general trend for the soil moisture was: farmland > grassland > shrub land > woodland. The differences in root distribution and evapotranspiration under different land use types resulted in the above trend; 3) six factors, including mean annual precipitation, latitude, clay content, sand content, silt content, and potential evaporation, were identified as the main factors affecting the soil moisture content determined by correlation analysis. The mean annual precipitation and clay content were identified as the most important factors influencing soil moisture using stepwise regression analysis. Compared with the clay content, the mean annual precipitation was the main factor determining the spatial variation in soil moisture under different land use types. This information is useful for environmental managers to ensure ecological restoration on the Loess Plateau.

Key Words: the Loess Plateau; soil moisture; land use type; spatial variation

土壤水是指地表面以下至地下水面(潜水面)以上非饱和带中的土壤水分[1]。在黄土高原,由于地下水水位较深,不参与 SPAC(土壤-植物-大气连续体)的水分循环,土壤水成为植物生长的重要水源之一(生长期降水和土壤水),对缓解气候干旱有重要作用,区内夏田作物总耗水的 1/4—1/3 由土壤底墒供给[2]。黄土高原处在半干旱半湿润地带,降水有限且分布极为不均,土壤水分亏缺已成为黄土高原植物生长发育的主要限制因子[3]。因此,了解土壤水分在黄土高原的空间变化对于人工植被的选种和布局有非常大的指导意义[4-6]。

关于黄土高原土壤水分的空间分布问题,许多学者分别从小区[7-8]、坡面[9-11]、流域[12-15]、区域[6,16-18]等多种尺度进行了全面而深入的研究。其中在区域尺度,李玉山等[16]研究了黄土高原土壤水分性质并进行了分区;穆兴民[17]研究了黄土区旱地水资源,并提出了土壤水资源的地带性与非地带性的概念;胡良军等[6]探讨了黄土高原土壤水分空间分异及其与林草布局的关系;王云强[18-21]和陈洪松[5,22]等研究了黄土高原的水分状况,对黄土高原的干层分布及其成因做了详细的研究。但针对黄土高原降水梯度变化揭示不同土地利用类型土壤含水量地带性分布规律及其影响因素的研究还较少,从降水、土壤质地、潜在蒸散等因素综合分析黄土高原不同土地利用类型土壤含水量地带性的研究还有待深入[21,23-24]。

本文通过测定黄土高原南北向 4 种土地利用类型(农田、草地、灌木林地和乔木林地)116 个样地 0—500 cm 土壤剖面含水量,系统分析不同土地利用类型土壤含水量的地带性规律,并比较降水、潜在蒸散、土壤质地等因素在决定土壤水分地带性分布中的相对重要性。研究结果可为黄土高原植树造林提供参考,为区域植被恢复和土壤水资源的合理利用提供指导。

1 研究材料和方法

在黄土高原,降雨量、潜在蒸散量、土壤质地和植被类型是影响土壤含水量的重要因素[14,16,25]。由于受大陆季风气候的影响,降雨量由东南向西北递减,有明显的地带变化[25-26];潜在蒸散量与降水量相反,从东南向西北递增[27-28];由于黄土沉积原因,土壤质地也有明显地带性,由北而南依次分布有沙壤土、轻壤土、中壤土和重壤土[16,29];植被覆盖度由东南向西北降低,植被类型也随之由森林向森林草原再向草原带过渡[30]。综合考虑上述 4 种因素在黄土高原的空间变化,本研究特选取黄土高原中部南北向样带(图 1),开展土壤水分调查。

1.1 试验布设

试验区选在黄土高原中部陕西省境内南北向长武-安塞-神木一线,地理坐标为北纬 34°05′—40°75′、东经 107°14′—111°09′,研究区面积 19.4 万 km^2,占黄土高原总面积的 31%。试验区多年平均降雨量在 250—

650 mm之间,植被类型有森林、森林草原、典型草原和荒漠草原 4 种[4],土壤类型主要以黑垆土、黄绵土、栗钙土为主[16,29]。

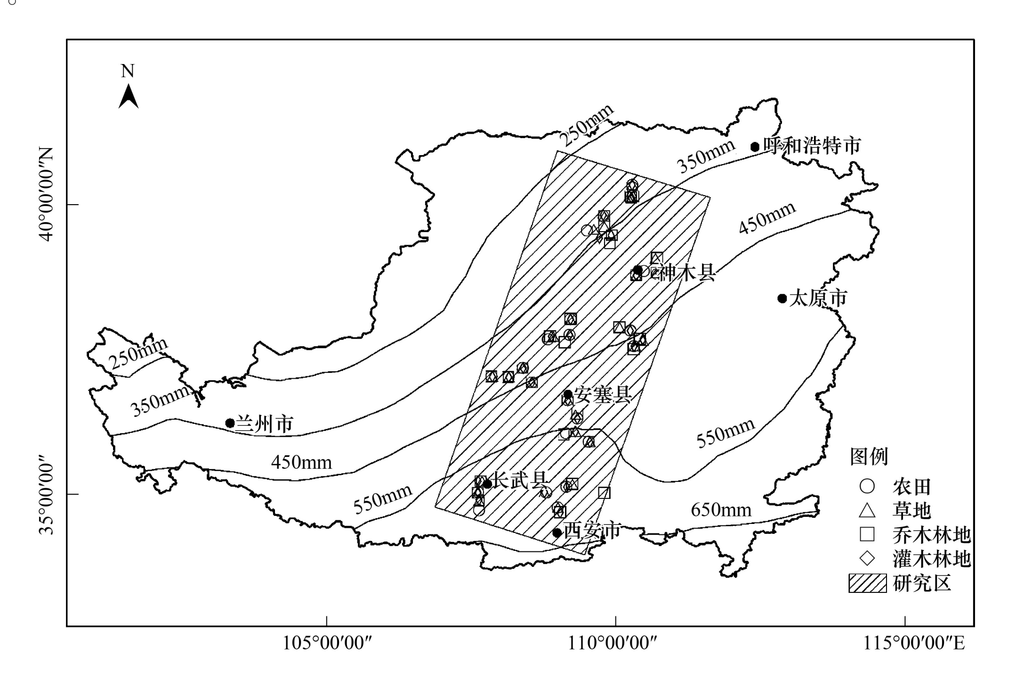


图 1　样带在黄土高原分布

Fig.1　The study transect on the Loess Plateau

土壤水分调查于 2014 年 7 月 2 号自样带最北端内蒙东胜开始,8 月 26 日至样带最南端陕西富平结束,期间通过实地考察,依据典型性和代表性原则,自北向南先后在 19 个市县采样,每个市县选取样地 1—3 组,包含农田、草地、灌木林地和乔木林地 4 种土地利用类型各一处样地为一组。其中内蒙古伊金霍洛旗、达拉特旗和陕西的神木县、横山县、延安市等面积较大的县样地一般为两到三组,其它市县为一组,两组样地之间纬度相差一般控制在 0.3—0.5 度。土地利用类型选取要求农田以玉米地为主,耕作年限 5a 以上,草地为天然草地或要求弃耕 5a 以上农地,乔灌林地林龄 10a 以上,都以坡地为主。每种土地类型样地在坡上、坡中和坡下选取 3 个点进行重复测定,每个点间隔 5—10 m,利用人工土钻取样方法获取 0—500 cm 深度剖面土壤样品(0—100 cm 土壤剖面,间隔 10 cm 取样; 100—500 cm 土壤剖面,间隔 20 cm 取样)用于测定土壤剖面含水量。同时在每个测定点收集 0—250 cm 土壤样品,用于测定土壤颗粒分布,另外,在坡中水分取样点 3 m 范围内用 100 cm^3环刀在 0—50 cm 深度采原装土,用于测定土壤容重,每 10 cm 取样,每层 5 个重复。在每个测定地点用手持 GPS 获取经纬度和海拔数据,并详细记录土壤、植被、坡度、坡向等数据。

由于黄土高原降雨量较小且 2014 年陕西省雨季较迟,7 月份内采样地点内蒙鄂尔多斯市、陕北榆林市等无明显降雨,8 月份采样至北纬 35°—36°范围内时有少量降雨。为了顺利到达采样点,每个采样点采样前 5 日内无降雨。最终除长武县、富县等少量几个样点外,其他样点受前期降雨影响较少。

本次共采样 116 处,共收集土壤水分样品数 9960 个,土壤容重样品 2900 个。

1.2　室内测定和分析

土壤水分用随行携带的烘箱于采样当天晚上采用“恒重烘干法”(105—108℃,10h) 测定;土壤容重通过“环刀法”测定;自然条件下风干土样过 2 mm 土壤干筛后用激光粒度仪测定土壤颗粒分布,用 FAO 分类标准获取砂粒、粉粒和粘粒含量。

降雨量、温度等气象资料通过中国气象数据共享网获得,并利用彭曼公式结合资料计算得到样带中各气象站点多年平均潜在蒸散量。用 Microsoft Excel 2010、SPSS 18.0 进行数据处理和方差分析。

2 结果与讨论

2.1 不同土地利用类型 0—500 cm 土壤剖面平均含水量的空间变化

将测定的农田、草地、灌木林地和乔木林地 4 种土地利用类型 0—500 cm 土壤剖面含水量进行加权平均获得剖面平均含水量,其结果随纬度变化如图 2 所示。由图中可以看出,4 种土地利用类型 0—500 cm 剖面土壤含水量整体上随纬度升高而减小,尤其是北纬 34°—38°之间,土壤含水量与纬度有明显的线性相关关系,这主要是多年平均降水量、潜在蒸散量、土壤质地等因素综合作用的结果。降雨作为黄土高原自然条件下土壤水分补给的唯一来源是决定土壤含水量的主要因素,其分布决定着土壤含水量的趋势是南高北低;土壤质地对于土壤水分的入渗和存储有重要影响,具体表现在高纬度地区多沙壤,容重大,储水差,地表蒸发强烈,而低纬度地区粉粒、粘粒含量高,容重小,持水力强,地表蒸发损失小。潜在蒸散量的大小主要影响植被耗水和地表蒸发,高纬度地区潜在蒸发量较之低纬度地区偏高也是导致土壤含水量南高北低的重要原因(表 1)。

对比分析图 2 中 4 种土地利用类型土壤含水量,发现农田最高,草地次之,这两种土地类型土壤含水量都是在低纬度地区随纬度升高而降低,但在高纬度地区却随纬度升高而略微升高,呈现出"V"型分布趋势,分析表 1 及查阅文献发现,黄土高原陕西境内沟壑区土壤质地粘,持水能力强,同时降水量较高,而潜在蒸散量较北面低,因而土壤含水量高。而内蒙地区多是灌溉农业,多分布在河网处,地下水位较高,导致农田土壤含水量高于神木、绥德、米脂等地[31];而草地也多为弃耕地,弃耕年份较短,且草地蒸散耗水少,所以也出现土壤含水量较高的情况。灌木和乔木的土壤含水量最低,低纬度地区分布趋势与农田、草地相似,但在高纬度地区却随纬度增加却没有明显变化,都保持在较低含水量状态。

表 1 不同纬度典型样点的测定内容

Table 1 The measured contents of typical sampled plots at different latitudes

测定指标 Index	样地 Plots				
	神木	横山	安塞	洛川	长武
土壤含水量 Soil water contents/(cm^3/cm^3)	8.95	6.06	15.47	14.33	14.14
土壤容重 Soil bulk density/(g/cm^3)	1.36	1.42	1.15	1.21	1.25
纬度 Latitude/(°)	38.80	38.02	36.72	35.90	34.22
降雨量 Rainfall/mm	427.00	378.90	505.30	612.00	579.60
砂粒含量 Sand content/%	31.50	53.60	32.20	14.00	3.90
粉粒含量 Silt content/%	53.30	34.10	51.10	74.20	74.30
粘粒含量 Clay content/%	15.20	12.30	16.70	11.80	21.80
潜在蒸散量 Potential evapotranspiration/mm	1098.29	1164.91	1025.86	1017.87	933.68

2.2 不同土地利用类型土壤剖面稳定含水量的地带性

由于测定期间正好是黄土高原的雨季,地表土壤含水量受测定前期降水事件的影响较大。为了消除雨季短时降水对土壤含水量地带性规律的影响,特意分析了土壤剖面稳定含水量的地带性。大量研究结果证实:地表 0—70 cm 是土壤含水量的速变层,70—120 cm 是土壤含水量的活跃层,120—200 cm 是土壤含水量的次活跃层,200 cm 以下是土壤含水量相对稳定层[17-18]。图 3 显示黄土高原农田、草地、灌木林地和乔木林地 4 种土地类型 200—500 cm 剖面土壤含水量随纬度变化。由图中可知,4 种土地利用类型 200—500 cm 剖面土壤含水量随纬度增加呈现出不同程度的减小趋势,自南向北有明显的地带性分布规律;不同土地类型土壤含水量比较总体上是农田最高,草地次之,灌木和乔木林地最低,其结果与傅伯杰[32]在延安市羊圈沟小流域的研究结果(农地>草地>林地)相吻合,而张志强[33]和刘刚[34]等分别在绥德县和吴起县也取得了相同的研究结果,说明该结果不仅在小流域内存在,在黄土高原大面积范围内也是适用的。但是也有局地差异,如部分地区出现草地土壤含水量较低等情况,这是因为黄土高原部分草本植物如像苜蓿耗水量大,且根系非常发达,可以吸收消耗深层土壤的水分,缩小了草地与灌木、乔木林地之间含水量的差距[18]。

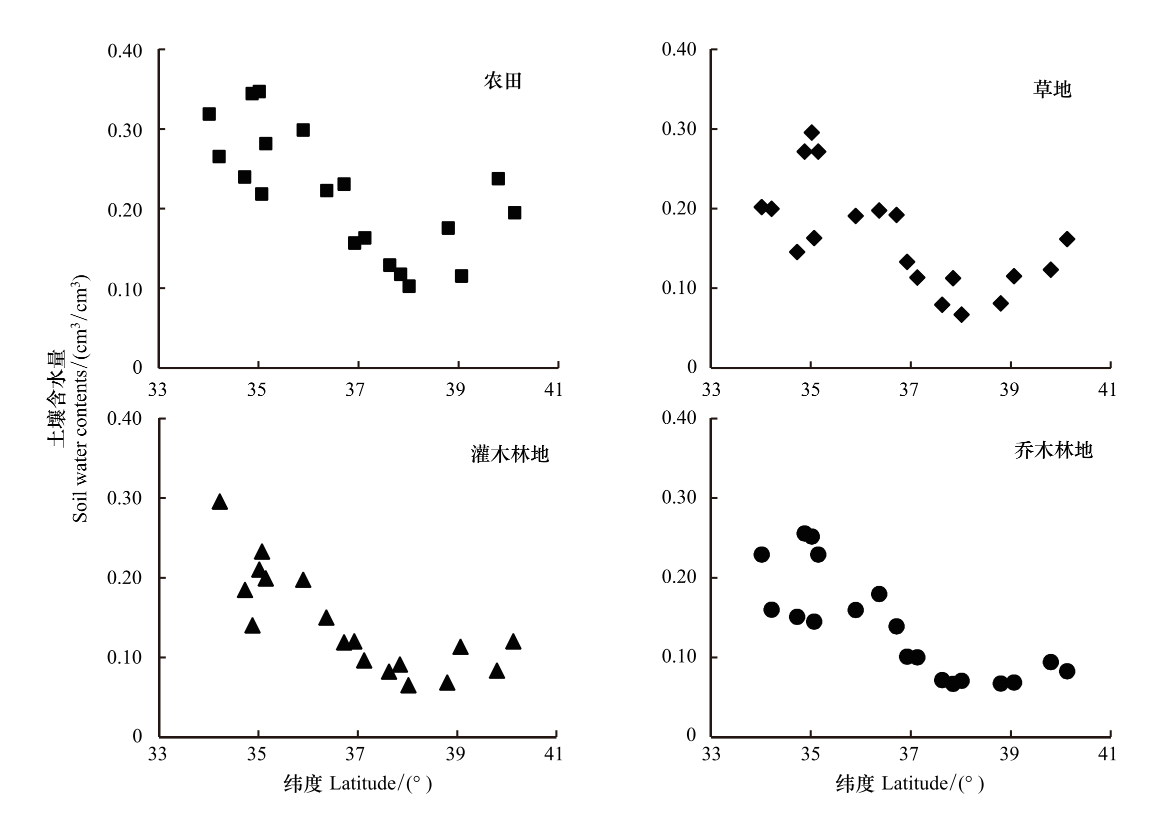


图 2　黄土高原农田、草地、灌木林地和乔木林地 0—500 cm 土壤剖面平均含水量随纬度的变化

Fig.2　The change of soil moisture with the latitude in farmland, grassland, shrub land and woodland on the Loess Plateau

2.3　不同土地利用类型土壤含水量的剖面分布与地带性

图 4 是黄土高原 4 种土地利用类型下土壤含水量剖面分布,自北向南依次是神木、安塞和长武,分别位于样带南北端和中间。由图 4 可知,农田的土壤含水量最高,在 0—70 cm 剖面范围内含水量逐渐增加,70—500 cm 剖面则是稳定趋势,其中 250 cm 剖面深度左右有一定波动,但波动不大。草地土壤含水量仅次于农田,在 0—150 cm 剖面范围内有增加的趋势,之后趋于稳定。灌木和乔木林地土壤含水量最低,其中在浅层范围内,灌木和乔木土壤含水量相当,根据林地生长年限长短和植被种类不同而互有高低,但随着土壤深度增加灌木林土壤含水量明显高于乔木林。

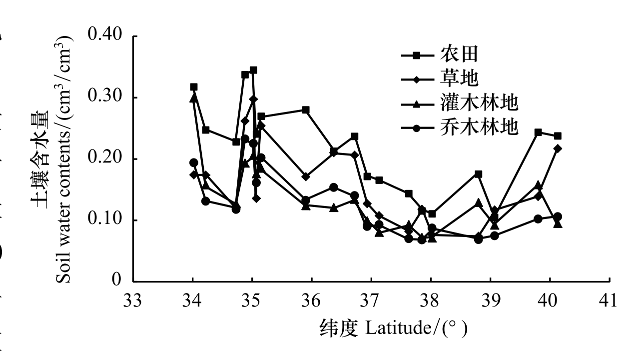


图 3　黄土高原不同土地利用类型 200—500 cm 土壤含水量随纬度的变化

Fig.3　The change of soil moisture in 200—500 cm with latitude under different land use types on the Loess Plateau

造成农田、草地、灌木和林地剖面水分差异的原因有很多,根据土壤水平衡原理,决定土壤水分含量的因素主要有降雨、植被截流、土壤蒸发、植被蒸腾、土壤水分渗漏等[5]。由于在同一地点条件下,降雨量、土壤蒸发量可认为相同,而黄土高原由于气候干旱,降雨补给非常有限,渗漏很难发生可以忽略不计,因此,植被截流与蒸散则是造成其土壤水分差异的主要原因,具体归结于:①不同植被类型的根系层分布不同,这就导致其根系所能吸收消耗的土壤水深度不同。据已有研究表明农田、草地、灌木和林地的根系主要分布在 0—100、0—300、0—400、0—600 cm 深度,这与不同植被类型下土壤水分剖面分布特征相吻合[18]。②不同土地利用类型条件下耗水量不同,一般趋势是:乔木>灌木>草地>农田[35]。③不同植被类型下降雨截留量不同,一般条件下林地由于其冠层较大导致截留量高于草地和农田[36];④人为因素的干扰。如农田土地翻耕破坏毛管水连

续性,灌溉和施肥会增加土壤水分含量;草地进行放牧减少了植被水分蒸腾等。

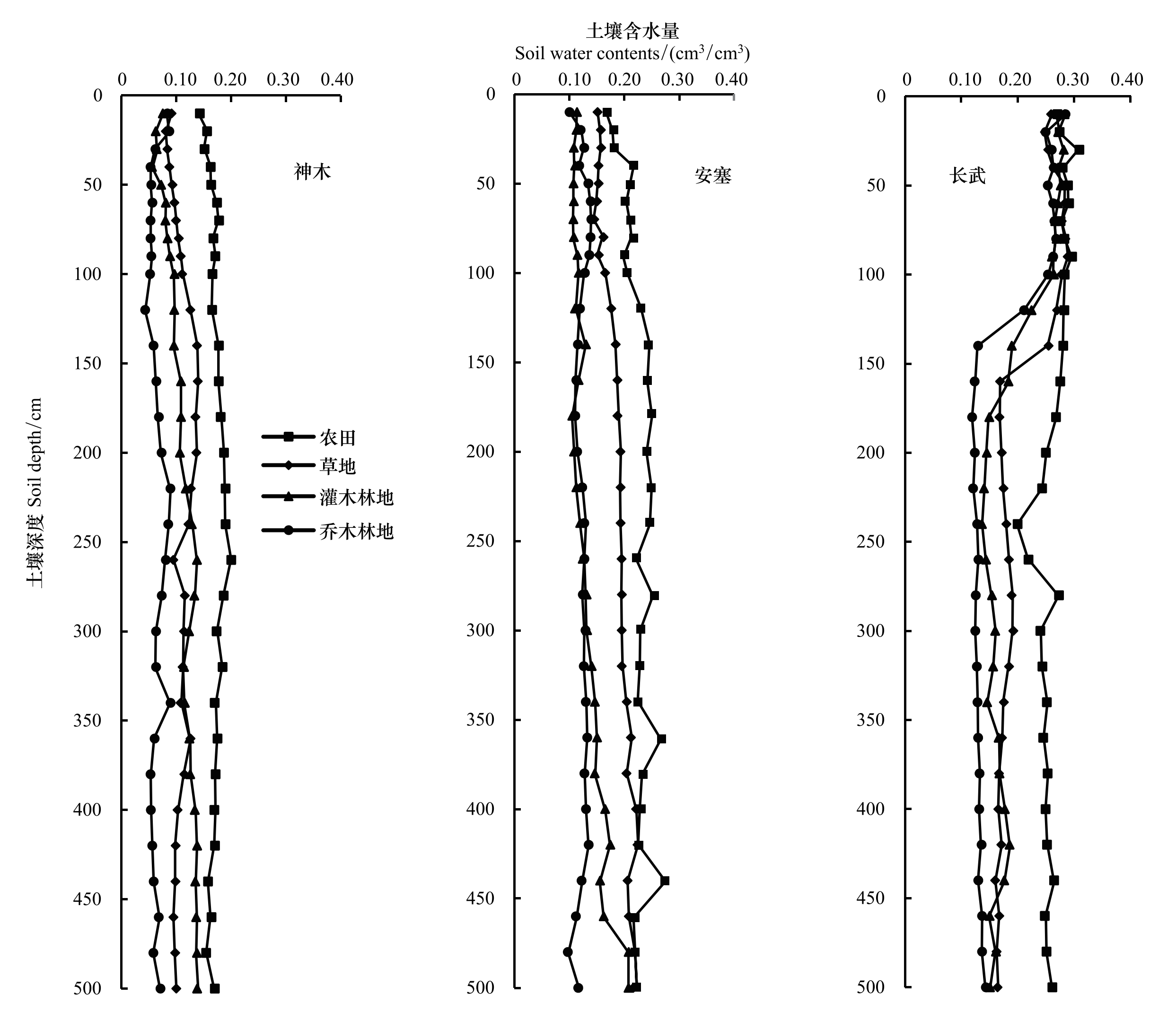


图 4 黄土高原不同土地利用类型土壤含水量的剖面分布

Fig.4 Profile distribution of soil moisture content under different land use types on the Loess Plateau

2.4 土壤含水量地带性分布影响因素分析

决定不同土地类型土壤水分水平差异性的因素有很多,如表 1 中列出的降雨、潜在蒸散量、土壤质地等因素,其分布特征与土壤含水量的分布有很强的规律性。表 2 列出了多年平均降雨量、潜在蒸散量、土壤沙粒-粘粒-粉粒含量和纬度与 4 种不同植被类型 200—500 cm 剖面土壤含水量的皮尔逊(Pearson)相关系数,结合图 3 不同土地利用类型土壤含水量分布规律发现:多年平均降雨量、纬度、砂粒含量、粉粒含量、粘粒含量与 4 种植被类型不同深度下土壤含水量都是极显著相关(P<0.01),其中纬度和砂粒含量是极显著负相关,其它是正相关;潜在蒸散量与土壤含水量相关性也较强,与草地是极显著负相关,与其他植被类型也是显著负相关;土地利用方面,草地与六种影响因子都有较强相关性,灌木、乔木林地次之,农田最差。分析原因可能是大部分草地根系都较浅,不影响土壤 200—500 cm 的水分环境,而且草地对降雨截留和入渗、自身的潜在蒸散量和对土壤质地影响都非常小,灌木和乔木对这些影响因子的改变相继增强,而人为活动对农田深层土壤水也有影响,所以才出现草地与其它影响因子相关性强,灌木、乔木林地次之,农田最差的情况[34]。

通过表 2 对不同土地利用类型土壤含水量的影响因素分析,确定了降雨量、潜在蒸散量等因素为土壤含水量的影响因子。为了提高分析的准确性,通过逐步回归法进行回归分析,回归分析结果见表 3。回归的标准化估计(SE)用于评价影响因素对土壤含水量的相对重要性。SE 值越大说明因素对土壤含水量的影响越大。

表 2　黄土高原不同土地利用类型土壤含水量与其影响因子的相关系数

Table 2　The correlation coefficient of soil water contents and its impact factor under different land use types

影响因子 Influence factor	农田 Farmland	草地 Grassland	灌木林地 Shrub land	乔木林地 Woodland
降雨量 Rainfall	0.884 **	0.891 **	0.864 **	0.917 **
纬度 Latitude	-0.795 **	-0.895 **	-0.909 **	-0.873 **
砂粒含量 Sand content	-0.855 **	-0.848 **	-0.825 **	-0.858 **
粉粒含量 Silt content	0.773 **	0.758 **	0.733 **	0.773 **
粘粒含量 Clay content	0.711 **	0.732 **	0.719 **	0.718 **
潜在蒸散量 Potential Evapotranspiration	-0.689 *	-0.810 **	-0.708 *	-0.769 *

＊＊极显著($P<0.01$), ＊显著($P<0.05$)

表 3　不同植被类型土壤含水量影响因素的多元线性回归分析

Table 3　The multivariable linear regression analysis for impact factors on soil water contents under different land use types

植被类型 Land use types	因素 Factor	系数 Coefficient	t	$P>t$	SE	调整后 R^2 Adjusted R^2
农田 Farmland	截距	-20.406	-5.636	0.000 *	0.000	0.905
	降雨量 /mm	0.061	6.969	0.000 *	0.750	
	粘粒含量/%	0.386	3.061	0.014 *	0.330	
草地 Grassland	截距	-24.449	-6.933	0.000 *	0.000	0.920
	降雨量 /mm	0.063	7.410	0.000 *	0.734	
	粘粒含量/%	0.446	3.625	0.006 *	0.359	
灌木林地 Shrub land	截距	-23.924	-5.984	0.001 *	0.000	0.843
	降雨量 /mm	0.058	4.983	0.001 *	0.691	
	粘粒含量/%	0.444	2.656	0.026 *	0.368	
乔木林地 Woodland	截距	-27.715	-6.677	0.000 *	0.000	0.900
	降雨量/mm	0.067	6.656	0.000 *	0.736	
	粘粒含量/%	0.450	3.111	0.013 *	0.344	

＊表示 t 检验在 $P=95\%$ 水平显著;SE 为标准化估计

逐步回归分析结果表明,4 种土地利用类型的自变量都是相同的,说明降雨量和粘粒含量是影响黄土高原土壤水分地带性空间分布的最重要的因素,其中降雨量的 SE 值明显高于粘粒含量,说明降雨量对土壤含水量的影响更大。而潜在蒸散量这一影响因素却没有进入回归模型,分析其原因可能潜在蒸散量与降水量之间有显著的负相关。分析前人研究结论主要有:李玉山[16]认为土壤质地是主要影响因素,提出了黄土高原土壤质地的两大特征,即颗粒的一致性和分布的地带性;穆兴民[17,25]最早明确提出了土壤水资源的地带性与非地带性的概念,并对黄土高原的降雨量进行了地带性分析。本文结果与前人研究相一致,而且比较了降雨量和土壤质地以及其它因素的重要性,并明确了土壤质地中最重要的影响因素是粘粒含量,合理利用降雨量、土壤质地和土壤含水量在黄土高原的分布规律对于植被恢复和水资源的有效利用有非常大的指导意义。

但是本研究还有一些不足,主要表现在:①由于样带南北跨度大、采样点选择难、单点采样耗时长等问题,整个采样期太长,采样期间降雨对表层一定深度内的土壤含水量有影响,导致采样点前期条件不一致,影响测试结果。在未来研究中,采样时间应尽量避开雨季;②植物类型选取问题,由于生长环境限制,同一种植物很难做到在整个样带内都有分布,如乔木林辽东栎只在样带南部延安地区分布,北部乔木林地则以白杨、油松为主。不同植物对土壤含水量的影响在本研究中不能区分;③坡向与植被类型的矛盾,如乔木林地多分布在阴坡,而草地多在阳坡,在样点选择时很难保证所有植被类型有相同的坡向,对结果有一定的影响[17]。这些问题在未来研究中应尽量克服,同时需要在样带内选取典型样地进行土壤水分的长期观测。通过在生长季内一定时间跨度上对土壤含水量和植被状况等指标的连续监测,探讨植被生长状况、影响因素和土壤含水量之间的关系,对不同土地利用类型土壤含水量的地带性特征与其影响因素作进一步的研究。

3 结论

对黄土高原南北样带农田、草地、灌木林地和乔木林地 4 种土地利用方式的 0—500 cm 剖面土壤含水量和 0—50 cm 剖面土壤容重进行测定和分析,研究结果表明:

(1)黄土高原 4 种土地利用类型南北向 0—500 cm 剖面土壤平均含水量的分布皆具有明显的空间变异性,在水平方向上自南向北递减,具有明显的南北向地带性变化,这与该区多年平均降雨量、潜在蒸散量、土壤质地等空间分布规律相一致。

(2)农地、草地、灌木林地和乔木林地 4 种土地利用类型的土壤含水量在水平方向上和垂直方向上皆具有明显差异性,结果是农田>草地>灌木林地和乔木林地。以上结果主要归结于不同植被类型条件下根系分布和蒸散耗水量的不同所导致的长期水循环过程。

(3)通过相关分析确定多年平均降雨量、纬度、粘粒含量、砂粒含量、粉粒含量和潜在蒸散量皆与土壤含水量有明显相关性,再通过逐步回归分析确定了影响土壤含水量最重要的影响因素是多年平均降雨量和粘粒含量,其中多年平均降雨量为最主要影响因素。

参考文献(References):

[1] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述. 水科学进展, 1999, 10(3): 311-318.

[2] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响. 生态学报, 1983, 3(2): 91-101.

[3] 林纾, 王毅荣. 中国黄土高原地区降水时空演变. 中国沙漠, 2007, 27(3): 502-508.

[4] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林. 自然资源学报, 2001, 16(5): 433-538.

[5] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 黄土区深层土壤干燥化与土壤水分循环特征. 生态学报, 2005, 25(10): 2491-2498.

[6] 胡良军, 邵明安, 杨文治. 黄土高原土壤水分的空间分异及其与林草布局的关系. 草业学报, 2004, 13(6): 14-20.

[7] Liu B X, Shao M A. Estimation of soil water storage using temporal stability in four land uses over 10 years on the Loess Plateau, China. Journal of Hydrology, 2014, 517: 974-984.

[8] Jia Y H, Shao M A, Jia X X. Spatial pattern of soil moisture and its temporal stability within profiles on a loessial slope in northwestern China. Journal of Hydrology, 2013, 495: 150-161.

[9] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异的尺度性研究. 农业工程学报, 2005, 21(8): 11-16.

[10] 王云强, 张兴昌, 从伟, 魏清才. 黄土区不同土地利用方式坡面土壤含水率的空间变异性研究. 农业工程学报, 2006, 22(12): 65-71.

[11] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子. 生态学报, 2012, 32(16): 4961-5968.

[12] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 陈利顶. 黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征——半变异函数. 地理学报, 2000, 55(4): 428-538.

[13] 肖庆礼, 黄明斌, 邵明安, 任利东. 黑河中游绿洲不同质地土壤水分的入渗与再分布. 农业工程学报, 2014, 30(2): 124-131.

[14] Gao X D, Wu P T, Zhao X N, Wang J W, Shi Y G, Zhang B Q, Tian L, Li H B. Estimation of spatial soil moisture averages in a large gully of the Loess Plateau of China through statistical and modeling solutions. Journal of Hydrology, 2013, 486: 466-578.

[15] Wang B, Wen F X, Wu J T, Wang X J, Hu Y N. Vertical Profiles of Soil Water Content as Influenced by Environmental Factors in a Small Catchment on the Hilly-Gully Loess Plateau. PloS One, 2014, 9(10): e109546.

[16] 李玉山, 韩仕峰, 汪正华. 黄土高原土壤水分性质及其分区. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1985, (2): 1-17.

[17] 穆兴民. 试论黄土区旱地土壤水资源的地带性与非地带性. 土壤学报, 1999, 36(2): 237-244.

[18] 王云强, 邵明安, 刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性. 水科学进展, 2012, 23(3): 310-316.

[19] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, Warrington D N. Regional spatial pattern of deep soil water content and its influencing factors. Hydrological Sciences Journal, 2012, 57(2): 265-281.

[20] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, Warrington D N. Investigation of Factors Controlling the Regional-Scale Distribution of Dried Soil Layers Under Forestland on the Loess Plateau, China. Surveys in Geophysics, 2011, 33(2):311-330.

[21] Wang Y Q, Hu W, Zhu Y J, Shao M A, Xiao S, Zhang C C. Vertical distribution and temporal stability of soil water in 21-m profiles under different land uses on the Loess Plateau in China. Journal of Hydrology, 2015, 527: 543-554.

[22] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China. Geoderma, 2008, 143(1/2): 91-100.

[23] 张文文, 郭忠升, 宁婷, 白冬妹. 黄土丘陵半干旱区柠条林密度对土壤水分和柠条生长的影响. 生态学报, 2015, 35(3): 725-732.

[24] 曾辰, 邵明安. 黄土高原水蚀风蚀交错带柠条幼林地土壤水分动态变化. 干旱地区农业研究, 2006, 24(6): 155-158.

[25] 穆兴民, 徐学选, 陈国良. 黄土高原降雨量的地理地带性研究. 水土保持通报, 1992, 12(4): 27-32.
[26] 王麒翔, 范晓辉, 王孟本. 近 50 年黄土高原地区降水时空变化特征. 生态学报, 2011, 31(19): 5512-5523.
[27] 王幼奇, 樊军, 邵明安, 白一茹. 黄土高原地区近 50 年参考作物蒸散量变化特征. 农业工程学报, 2008, 24(9): 6-10.
[28] 史建国, 严昌荣, 何文清, 刘克礼, 刘勤. 黄河流域潜在蒸散量时空格局变化分析. 干旱区研究, 2007, 24(6): 773-778.
[29] 黄土高原综合治理方案组. 黄土高原综合治理分区. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1985, (1): 2-66.
[30] 李杏鲜, 连晋姣, 黄明斌. 黄土高原中部降水梯度带植被覆盖度动态变化特征. 水土保持通报, 2014, 34(2): 272-275.
[31] 郑玉峰, 王占义, 方彪, 何晨, 李路建, 李春筱. 鄂尔多斯市 2005-2014 年地下水位变化. 中国沙漠, 2015, 35(4): 1036-1040
[32] 傅伯杰, 王军, 马克明. 黄土丘陵区土地利用对土壤水分的影响. 中国科学基金, 1999, (4): 225-227.
[33] 王志强, 刘宝元, 张岩. 不同植被类型对厚层黄土剖面水分含量的影响. 地理学报, 2008, 63(7): 703-713
[34] 刘刚, 王志强, 王晓岚. 吴旗县不同植被类型土壤干层特征分析. 水土保持研究, 2004, 11(1): 126-129.
[35] 王彦辉, 熊伟, 于澎涛, 沈振西, 郭明春, 管伟, 马长明, 叶兵, 郭浩. 干旱缺水地区森林植被蒸散耗水研究. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 19-25.
[36] 王爱娟, 章文波. 林冠截留降雨研究综述. 水土保持研究, 2009, 16(4): 55-59.